

面向 2035 信息领域激光技术发展趋势展望

“我国激光技术与信息应用 2035 发展战略研究”课题组

摘要：激光技术自发明以来，就开始广泛应用于信息领域。激光技术促进了信息技术突飞猛进的发展，已是当今信息科技发展的主要动力。“我国激光技术与信息应用 2035 发展战略研究”是中国工程院设立的重点咨询项目“我国激光技术与应用 2035 发展战略研究”的课题之一，旨在对我国激光技术在信息领域的应用及相关产业发展情况开展全面研究，凝练信息领域激光技术的发展趋势，提出能够促进该领域发展的合理建议。本文通过介绍光通信、激光显示、光存储、光传感等几个激光技术在信息领域的主要应用，对其国内外研究和现状、主要关键技术、国内外产业发展情况进行了深入分析，研究提出：确立研究方向重点，布局核心技术开发；搭建产业创新平台，提高技术创新水平；注重知识产权保护，加强高端人才培养；引导“政产学研”协同，促进成果转化合作；加大政策扶持力度，引导行业健康发展；发挥产业集聚优势，增强企业竞争能力。

关键词：激光技术；光通信；激光显示；光存储；光传感

中图分类号：TN249 **文献标识码：**A

Development Trend of Laser Technology Application in the Information Field Toward 2035

Research Group of *Strategic Research on China's Laser Technology and Its Application in Information by 2035*

Abstract: Laser technology has been widely used in the field of information since it was invented and has promoted the rapid development of information technology, which has become the main driving force for the development of information technology. “Strategic Research on China’s Laser Technology and Its Application in Information by 2035” is a key sub-project of the major consulting project “Strategic Research on China’s Laser Technology and Its Application by 2035” launched by the Chinese Academy of Engineering. It aims to conduct a comprehensive research on the application of laser technology in the information field and on the development of related industries in China; analyze the development trend of laser technology in the information field; and propose suggestions to promote the development of the field. This paper introduces the major application of several laser technologies—optical communication, laser display, optical storage, and optical sensing—in the information field, and analyzes the research and development status of laser technology, the major key technologies, and the development of related industries in China and abroad. To promote the laser technology application in the information field, we suggest that China should establish key research directions and promote the development of core technologies; build an industrial innovation platform to improve technological innovation; lay emphasis on intellectual property protection and strengthen the training of high-end talents; guide the cooperation of government, industry, education, and research to promote achievement transformation; increase policy support and guide the healthy development of the industry; exploit the advantages of industrial agglomeration to enhance the competitiveness of enterprises.

Keywords: laser technology; optical communication; laser display; optical storage; optical sensing

收稿日期：2020-03-26；修回日期：2020-04-15

联系人：王天枢，E-mail: wangts@cust.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国激光技术与应用 2035 发展战略研究”（2018-XZ-27）

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

与传统光源相比，激光光源具有单色性好、相干性强、亮度高和方向性好等优点，在工农业生产、通信、医疗、科研、国防等诸多领域具有极为广泛的应用。激光的发明和发展引发了光学的重大变革 [1]，推动信息技术发展突飞猛进，并引领人类进入信息时代。尤其是半导体激光器的问世，直接促成了光纤通信技术的应用，使通信技术的发展从电子时代跨入光电子时代。

激光技术的迅速发展已渗入到信息技术领域的各个方面，作为电子信息技术的延伸和发展，取得了举世瞩目的成就，已成为当今信息科技发展的主要推动力。目前，激光在信息领域的应用技术已经发展出激光成像、测距、传感、探测、通信、信息处理、显示、存储等多个方向，对推动国家信息化、国防建设、航空航天、能源环境等民生及国家重大战略安全领域做出了巨大贡献，也为科学探索和科技创新提供了前所未有的手段和机遇。

激光在信息领域的技术及产业发展关系到我国创新型国家的全面发展战略目标的实现。经过数十年的发展，虽然我国激光信息技术取得了重要的进展，然而在基础元器件开发及产业化等方面与国际先进水平仍存在较大差距。面对激烈的国际竞争，需要抓住国际科技和经济发展，以及我国经济结构调整的战略机遇，加快发展激光信息技术和产业能力。

二、激光技术在信息领域的应用现状

激光技术在信息领域的广泛应用，直接推动了人类文明进入信息时代，对信息领域具有最深远和广泛的影响，并突出体现在基于激光技术发展起来的光通信、激光显示、光存储、光传感等几个信息领域。

（一）光通信技术

现代通信技术对激光的依存度非常高，是激光技术最重要的应用领域，采用激光为载波的光通信技术已经成为最重要的现代通信技术。光通信可以实现语音、图像和数据等信息传输，具有速率高、容量大、抗干扰能力强等优点，根据传输媒介主要

分为光纤通信和无线激光通信。

1. 光纤通信

光纤通信以激光源为载波、光导纤维为传导媒质，来实现信息的传输，已经应用 40 多年。光纤通信的传输速度更快、能量损耗更小、激光调制速率更高，对通信性能的提高是颠覆性的，具有巨大的经济价值和无限的产业前景 [2]。华人科学家高锟发明的低损耗光纤与半导体激光器等一系列技术的突破推动了光纤通信在 1976 年开始商业化应用，并发展了 0.85 μm 、1.31 μm 和 1.55 μm 三个波段激光载波以及波分复用、相干通信等第五代通信技术，随着激光器性能的提高，单信道 400 Gb/s 商用设备已投入运营。

由于光纤通信带宽的提升，发端于 20 世纪 60 年代的美国国防部网络演化成为目前全球通用的互联网，形成了信息高速公路。另外，正因为近 20 年来光纤通信技术推动着网络容量不断提高（已达每秒几十太字节），才使移动通信带宽和服务用户数量不断扩大，成为当今发展最快的领域。作为 20 世纪人类社会所取得的最伟大的技术成就之一，光纤通信技术是人类向信息化时代迈进不可替代的重要基石，已成为全球信息化的支撑技术，导致了经济全球化，改变了形成几百年的经济模式，人类生活质量获得迅速提升。

我国在光纤通信技术和产业方面均取得了较快发展 [3]，光通信设备和系统的研制以及工程应用能力已经跻身世界一流水平。以华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、长飞光纤光缆股份有限公司、烽火通信科技股份有限公司为代表的中国通信企业已经成长为所在领域排名前列的顶尖高科技企业。目前，我国生产能力和市场占有率均位列世界第 1，通信用激光器等光电子器件的产量和市场约占全球 1/2，光传输设备和市场占比超过 1/3，技术仅次于美国和日本 [4]。

2. 无线激光通信

无线激光通信结合了无线电通信和光纤通信的优点，抗干扰能力强、抗截获能力强、安全性好、通信速率高、传输速度快、信息容量大，还具有系统体积小、重量轻、功耗低、施工简单、灵活机动的特点，在军事和民用领域均具有重大的战略需求与应用价值 [5,6]。

美国、欧洲、日本、俄罗斯等国家及地区早

在 20 世纪 70 年代就开展了天基、大气及水下信道的无线激光通信研究,通过多年研究和实验验证,激光卫星通信已经表现出与微波卫星通信的巨大优势。2008 年,德国航空航天中心(DLR)利用 Tesat 卫星开展了星间 45 000 km 在轨激光通信试验验证,采用 1.06 μm 激光载波的速率为 5.625 Gb/s。美国国家航空航天局(NASA)在 2013 年 10 月成功试验了月地间 4×10^5 km 激光信息传输,最大下行和上行速率分别为 622 Mb/s 和 20 Mb/s [7,8]。

我国在 20 世纪 70 年代就开始了大气激光通信技术研究,20 世纪 90 年代启动了空间激光通信研究项目,并迅速赶上了国际先进水平。2007 年,长春理工大学率先突破远距离光束的捕获、对准、跟踪技术,首次实现双动态激光通信,2013 年成功试验了我国首次固定翼飞机间远距离激光通信,速率为 2.5 Gb/s,传输距离为 144 km,超过了同类试验国际最远距离。2011 年,哈尔滨工业大学开展了我国首次星地激光通信链路数据传输试验,下行最高速率为 504 Mb/s。2017 年中国科学院上海光学精密机械研究所开展了我国首次星地高速相干激光通信技术试验,下行最高速率达 5.12 Gb/s。同年,搭载“实践十三号”高通量卫星的星地激光通信终端开展的世界上首次高轨卫星对地高速激光双向通信试验取得成功,40 000 km 星地距离最高速率为 5 Gb/s。

无线激光通信技术获得了全面突破,并延伸到水下、大气和室内可见光通信。随着人类科技进步和对信息的需求,无线激光通信技术将成为通信领域举足轻重的传输技术,推动物联网、智联网的发展,甚至改变人类生产、生活和文化模式。

(二) 激光显示技术

激光显示技术是继黑白显示、彩色显示、数字显示之后的第四代显示技术,是激光技术、光电子技术、半导体技术等高速发展、综合集成的产物。随着激光技术的成熟,激光显示突破了 12 bit 颜色灰阶编码不重叠,亮度高并可精确控制在人眼最佳视觉感知区,实现 8 K 几何高清,三基色半导体激光器(LD)激光显示技术是唯一能够全面实现 ITU-BT.2020 标准的显示技术。由于激光具有方向性好、单色性好和亮度高三个基本特性,可实现大色域、双高清(几何、颜色)视频图像显示和真三维显示,被认为是实现高保真图像再现的最佳技术

途径,是新型显示的主流发展方向 [9]。

激光显示在国内的技术研究进展迅速,在国家高技术研究发展计划(863 计划)和中国科学院创新工程计划支持下,中国科学院理化技术研究所许祖彦院士团队于 2005 年在国内首次研制成功激光全色投影显示原理样机(全固态激光源),总体水平世界先进,色域覆盖率(79%)等关键技术国际领先。2015 年研制成功国际首台 100 in 三基色 LD 激光电视样机,证明了激光显示技术实现产业化的可行性。《“十三五”规划纲要》已将激光显示列为新一代信息技术新型显示项目的首位。通过多年攻关,中国申请和授权的激光显示专利已经超过 7000 项,占全球激光显示专利比例的 50% 以上,并被选为 IEC-TC110 激光显示工作组的召集国,主导和参与制定多项国际电工委员会(IEC)国际标准 [10]。

虽然国内三基色 LD 器件的功率、效率、可靠性等与国外尚有差距,但激光显示三基色 LD 光源技术及应用已进入快速发展阶段,有望在短期内实现突破。

(三) 光存储技术

随着各种信息爆炸式增长,日常需要处理的信息容量将以太字节计,信息流以太字节每秒计。激光器发明后,光存储技术获得了发展,采用激光光源,颠覆了磁存储技术的容量概念。光存储采用非接触方式读、写、擦,对盘面损伤小,数据存储寿命长且存储介质稳定,数据可保存 10 年以上,且移动性好、成本低,成为当今乃至未来应用最广、效率最高、容量最大的存储技术。面对大数据、云计算、物联网、人工智能的需求,超大容量光存储技术得到快速发展,容量已经超过太字节,并发展了体全息存储、近场光学存储和双光子双稳态存储技术等多种光存储技术。采用激光全息技术的全息存储,能实现三维图像存储,具有更大的存储容量 [11]。

国内的光存储技术已经发展了三代,大部分技术都掌握了自主知识产权,具备了第四代乃至第五代光存储技术的条件、实力与能力。光存储正在突破衍射极限向超高密度信息存储方向发展,由二维到多维存储。新型大容量光存储技术研究及实用化发展迅速,蓝光存储技术已实现产业化并在不断扩大规模,双光束超分辨和玻璃存储技术进入工程

化和产业化推进阶段，多波长多阶光存储和全息存储等技术已趋向成熟，而荧光纳米晶体存储、脱氧核糖核酸（DNA）存储技术及近场光存储等技术的研究也不断取得进展。随着激光器性能的提高和存储技术的进步，2019 年单个光盘存储容量已达 500 GB。

（四）光传感技术

光传感技术与光通信技术相似，是以光为载体，感知和传输外界信号（被测量）的传感技术。从大规模应用角度来看，主要光传感技术大体分为激光雷达和光纤传感，其他一些光电传感、激光传感器技术分布在很多行业，伴随着行业技术的进步不断发展。

1. 激光雷达

激光雷达技术自 1960 年第一台激光器发明就已经开始研究，用于环境感知和测距，第一台激光测距仪于 1961 年在美军投入使用。相比毫米波、微波和超声波雷达等相对成熟的传统雷达技术，激光雷达可以极大提高雷达的距离、角度和速度分辨力，而激光的高方向性和高相干性使其能够远距离抗干扰探测 [12]。激光雷达从军事应用开始，成为最先进的主动遥感工具，发展了单点测距型、单通道扫描成像、多通道扫描成像、面阵成像等，从单通道二维扫描成像雷达发展到条纹管凝视成像雷达和门选通距离成像激光雷达。

用于大气监测，差分吸收激光雷达能够对水蒸气、臭氧、大气污染物等进行测定，后向散射激光雷达探测云-气溶胶和可吸入颗粒物的浓度和立体分布，多普勒激光雷达测量风速和风切变等信息，并能够检测沙尘暴。激光雷达还可以探测海洋深度、暗礁、鱼群和勘察海难，探测深海中难以发现的宝贵资源、海洋浮游生物和叶绿素浓度等，利用拉曼散射测量海洋次表层温度，利用布里渊散射可测量温度、海洋声速和盐度，利用荧光效应测量因各种事故而泄露在海面上的油气。在军事上，激光雷达用于侦察成像、障碍物躲避、化学试剂探测、水雷探测和武器制导等。激光雷达可以用于对目标的三维测绘、航天器交会对接。另外，激光雷达技术已经是无人驾驶领域的关键技术，未来会改变人类社会的交通方式。

激光雷达关键技术主要包括激光发射机技术、

空间扫描技术、高灵敏度接收机设计技术、终端信息处理技术等。激光雷达依赖激光器（激光发射机）性能，按激光波段分为紫外激光雷达、可见激光雷达和红外激光雷达，按激光介质分为气体激光雷达、固体激光雷达和半导体激光雷达，按发射波形分为脉冲激光雷达、连续波激光雷达和混合型激光雷达等。激光器的技术发展直接决定了激光雷达的技术进步和应用推广。随着新兴的光纤激光器、量子级联激光器等技术的发展，激光器在波段拓展可谐调及线宽、能量、脉冲等技术指标上不断提高性能，也将促进激光雷达达到更高的测量精度和更好的实用性。

2. 光纤传感

光纤传感技术随着光纤通信技术的发展成熟，采用激光源作为传感信号，利用光纤及光纤器件等作为传感器，通过对传感激光的解调获得传感信息，具有不受电磁干扰、体积小、分布式、易集成、测量精度高、可自组网等优点。

在实际应用中，往往将各种传感器组成光纤传感网，对多种信号进行测量。根据光纤传感网络的应用需求，采用了量子级联激光器、激光二极管、发光二极管、布里渊光纤激光器、拉曼光纤放大器等各种激光源作为传感源，对温度、压力、流量、位移、振动、转动、弯曲、液位、速度、加速度、声场、电流、电压、磁场及辐射等物理量进行测量 [13]，已经广泛应用于军事、国防、航天航空、工矿企业、能源环保、工业控制、医药卫生、计量测试、建筑、家用电器等多个领域。

光纤传感技术在大型建设工程施工行业发挥了重要作用。1993 年，加拿大就将光纤传感器预装在一座碳纤维预应力混凝土公路桥上，通过动态规化理论处理数据，准确快速地评估了桥梁的使用状态及寿命。我国三峡水利枢纽工程，大坝坝体内部靠近上游面埋设的光纤 Bragg 光栅温度传感器，所测温度与水银温度计直接测量水温相比，精度更高。目前，应用最为广泛的是光纤阵列传感系统，可以实现大范围、长距离多点传感，结合分布式光纤传感系统，成为大规模光纤传感最主要的发展趋势，大型基础设施的分布式监测系统都采用了光纤阵列传感技术，如北京鸟巢体育场、广州电视塔、高铁线路等。可见，现代工业、基础设施、能源等领域已经越来越离不开光纤传感技术的保障。

三、2035 激光技术通信领域发展趋势展望

(一) 光通信技术

目前,我国光纤通信已经突破一根普通光纤中 100 Tb/s 数据传输 80 km,向超高速、超大容量、超长距离的“三超”方向发展 [14]。预计到 2025 年可实现 100 Tb/s 超高速光纤通信系统,并于 2035 年全面实现通信前端的关键电子、光子和光电子器件集成应用,突破 1000 Tb/s 光纤高速信息传输。未来光纤通信技术将为人类带来更加深远的影响,也是我国实现“两个一百年”伟大目标的强劲动力。

通过轨道角动量复用等新技术,无线光通信研究已经可以实现每秒太字节级的传输,但传输距离受限,远距离传输依然很难突破 10 Gb/s。通过光源、放大器及探测系统的发展进步,预计到 2025 年可实现 40 Gb/s 空间高速激光远距离传输,甚至用于航天通信。随着 2035 年在光纤通信前端的关键电子、光子和光电子器件全面实现集成应用的推动,空间激光通信能够突破 100~400 Gb/s 高速系统实用化,同时也将在空间信息网络、深空通信、宽带接入、水下探测等方面获得全面应用。

(二) 激光显示技术

显示领域总体朝着高清、高颜色饱和度的激光二维和三维显示技术发展,包括激光全息显示技术、MicroLED 显示技术、柔性显示技术,系统更小型化,更高分辨率,更广色域是发展趋势。我国在 2022 年将实现超高清视频,激光显示解决 4K/8K 超高分辨率显示芯片、超高清视频图像的获取/存储/处理/传输、人眼生物学特征和视觉心理特性等关键技术。三基色 LD 光源,红光 LD 单管功率可达 2 W (寿命超过 10 000 h),蓝光 LD 单管最大输出功率达 2.8 W (寿命已超过 5000 h),绿光 LD 最大输出功率达到 500 mW,突破实用化水平,彻底解决依赖进口的问题。预计到 2025 年的总体发展目标应为实现超高清和头戴眼镜式的三维显示技术。预计到 2035 年的总体发展目标应为实现裸眼三维显示技术。

(三) 光存储技术

预计在 2022 年左右与光存储相关的单项技术

和系统集成技术将达到稳定,存储购买成本可达 1 美分/GB [15]。近年来,飞秒激光器等超快激光性能迅速提高,使新存储技术不断突破,结合性能更优良的存储介质材料技术的进展,高存储容量、密度、可靠性和数据传输率的存储技术将实现超大容量、超高效率、超高吞吐率、低成本及广泛兼容性的光存储产品,而相应的行业标准、国家标准和国际标准也将越来越完善,在各行各业得到普及。预计到 2025 年可实现太字节量级的光盘存储器,到 2035 年突破拍字节量级的光盘存储系统。

(四) 光传感技术

激光雷达向高灵敏度、高信噪比、高分辨率和宽测量范围发展,传感前端的专用性能向集成、多参数、多功能方向发展,算法伴随人工智能实现智能传感。预计到 2025 年激光雷达将全面用于车联网、无人驾驶等领域,成为无人驾驶领域的主要增长力,技术将突破三维雷达成像。到 2035 年,随着绝大多数汽车向着智能化方向发展,无人驾驶也将成为驾驶的最重要部分,全面智能化的激光雷达技术将成为陆、水、空中有人和无人驾驶领域的核心器件。

随着窄线宽激光器等先进激光技术的发展,智能光纤传感网技术将会更加成熟,在各个领域将发挥更大的作用,为提升我国自主创新能力、增强我国信息产业的国际竞争力、促进国民经济的快速可持续发展做出更多更大的贡献。预计到 2025 年能够实现超高分辨率的超快光纤传感技术,到 2035 年分布式智能光传感系统进入海洋、地心、太空等超远领域,成为广域物联网最重要的基础设施。

四、政策建议

目前,我国激光应用的信息技术处于蓬勃发展时期,机遇与挑战并存。一些关键核心技术和工艺尚有差距,鉴于当前国际政治、经济形势的严峻性,技术及产业发展必然遇到外部制约。由于其在民生、工业、军事等方面具有的普遍意义,为促进我国激光应用信息技术和产业到 2035 年处于世界领先地位,在激光应用信息领域,提出以下发展建议。

（一）确立重点研究方向，布局核心技术开发

针对我国激光技术的信息应用和产业发展现状，分析当前激光信息技术发展、产业落地和大规模应用过程中需要突破和解决的关键技术瓶颈，根据轻重缓急程度确立需要重点突破的研究方向，并在国家层面通过各类科技计划进行针对性布局，发挥国家科技计划的引导作用，强化技术创新的支持政策。完善“产学研用”协同创新机制，集中“产学研”优势力量开展技术攻关，共同开展基础理论创新和前瞻性技术研究，着力攻克并解决当前激光信息技术发展中的瓶颈，提高关键器件及整体系统水平，推动激光信息技术产品和服务的标准化建设，推动激光信息技术生态模式和服务模式的创新发展。

（二）搭建产业创新平台，提高技术创新水平

通过有效的政策引导和支持，使高校、科研院所、企业成为技术创新的投入主体。大力推进“政产学研用”相结合，支持有条件的企业同科研院所、高等学校联合建立研究开发机构、产业技术联盟等创新组织，结合当前技术发展瓶颈，发挥龙头企业主导作用和高校、科研院所的基础研究能力，组织开展跨行业、跨领域、跨区域的“产学研用”协同创新，提高技术创新水平。

（三）注重知识产权保护，加强高端人才培养

建议加大新兴技术知识产权保护力度，建立专利池，支持技术转移机构开展专项业务，尤其对空间激光通信、激光显示等技术转移的机构给与重点支持。对掌握关键技术和拥有深度开发能力的高端人才需求开展调查和预测，逐步建立健全激光信息技术领域的高层次人才信息库，通过推进和加强“政产学研”合作引导产业和人才的聚集。推动高校加强和丰富激光信息技术领域学科专业建设，精准培养科研人员和技术人才。

（四）引导“政产学研”协同，促进成果转化合作

建议大力推进“政产学研用”相结合，支持有条件的企业同科研院所、高等学校联合建立研究开发机构、产业技术联盟等创新组织，建立并优化不同层面之间的协调机制和组织机构，搭建激光信息技术跨界交流合作平台，集聚行业内外的重点企业、

高等院校、科研院所、配套供应商等开展技术需求对接，促进各高校激光信息技术研究团队之间的跨学科对话与合作，推动数据资料合理共享，促进务实合作与协同创新。鼓励并支持各相关领域产业协会和学术组织内部的协作与合作，推动研究机构 and 产业部门之间的广泛交流、信息和成果共享，提高相关技术创新水平和产业化能力。

（五）加大政策扶持力度，引导行业健康发展

建议依托国内现有的技术储备基础，由政府牵头组织高校、科研院所、重点企业共同建立一批国家重点实验室、工程研究中心等激光信息共性技术科研平台或联合实验室，协同多方力量解决关键技术和应用基础问题。加大研发投入，跟踪技术产业化发展过程，坚持规模应用导向与技术断点弥合的研发思路，提高创新资源利用效率与产出水平。在国家统一协调和管理下推动激光信息领域中关键技术标准的制定与实施，激光信息技术的相关产业广泛涉及到从基础硬件生产、软件开发、核心部件制造、实体机网络分发平台、营销与服务以及众多军事与民用行业领域，需通过技术标准体系及关键标准的制定、标准复合型检测和相应的质量验证系统的支撑，使产业健康可持续发展。

（六）发挥产业集聚优势，增强企业竞争能力

建议充分发挥激光信息技术领域产业集群优化，降低集群区内企业的采购和供应成本，便利各个环节企业之间的沟通互动，促进企业之间的协作，促进集群区内部各企业之间的技术交流，形成技术创新环境，促进劳动力组织的专业化，使产业相关技术人才更容易聚集并形成集约优势。打破传统批次封闭、烟囱式的产业发展框架，对激光信息技术产业链进行网状重构。鼓励各产业集群在商业模式、网络构架、内容应用等方面的创新变革，加强各产业集群中相关产业链上、中、下游之间的交流与合作，实现单点突破向产业集聚的转变，推动产业集群间的优化分工。采取前瞻技术提前布局、支持政策定向引导、市场环境 with 需求适当刺激、产业规模适度扩张等政策，大幅度提高企业竞争力。

参考文献

[1] 王大珩. 激光, 具有巨大的生命力 [J]. 中国激光, 2000, 27(12):

- 1058–1062.
Wang D H. Laser possesses tremendous vitality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(12): 1058–1062.
- [2] 赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 99–101.
Zhao Z S. Past, present and future of optical fiber communications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 99–101.
- [3] 赵梓森. 中国光纤通信发展的回顾 [J]. 电信科学, 2016, 32(5): 5–9.
Zhao Z S. Review of the development of China's optical fiber communication [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 5–9.
- [4] 赵梓森. 光纤通信技术和产业概况 [J]. 科技导报, 2014, 32(8): 1
Zhao Z S. Overview of optical fiber communication technology and industry [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(8): 1
- [5] 姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
Jiang H L, Tong S F. The technology and system of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [6] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析 [J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207–217.
Jiang H L, An Y, Zhang Y L, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015, 34(3): 207–217.
- [7] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration [R]. San Francisco: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2014.
- [8] 许祖彦. 光电子晶体与全固态激光器及其应用——光电子技术发展的一个重大方向 [J]. 中国工程科学, 1999, 1(2): 72–77.
Xu Z Y. Optoelectronic crystals, all-solid-state lasers and their applications——An important course of optoelectronics R & D [J]. Strategic Study of CAE, 1999, 1(2): 72–77.
- [9] 许祖彦. 显示技术将接近人眼视觉极限 [R]. 合肥: 首届世界显示产业大会·院士讲坛, 2019.
Xu Z Y. Display technology will approach the limit of human vision [R]. Hefei: The first World Exhibition Industry Conference · Academician Forum, 2019.
- [10] 颜珂. 激光显示的研创未来 [J]. 产城, 2019 (11): 76–77.
Yan K. The future of laser display [J]. Industry City, 2019 (11): 76–77.
- [11] 金国藩, 张培琨. 超高密度光存储技术的现状和今后的发展 [J]. 中国计量学院学报, 2001 (2): 9–15, 18.
Jin G F, Zhang P K. Trends in research on super-high density optical storage [J]. Journal of China Institute of Metrology, 2001 (2): 9–15, 18.
- [12] 陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展 [J]. 光电工程, 2019, 46(7): 47–57.
Chen J Y, Shi Y C. Research progress in solid-state LiDAR [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 47–57.
- [13] 刘铁根, 于哲, 江俊峰, 等. 分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展 [J]. 物理学报, 2017, 66(7): 60–76.
Liu T G, Yu Z, Jiang J F, et al. Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 60–76.
- [14] 余少华, 杨奇, 薛道均, 等. “三超”光传输关键技术研究 [J]. 光通信研究, 2014 (6): 1–6, 10.
Yu S H, Yang Q, Xue D J, et al. Research on key technology of 3U optical transmission [J]. Study on Optical Communications, 2014 (6): 1–6, 10.
- [15] 苏文静, 胡巧, 赵苗, 等. 光存储技术发展现状及展望 [J]. 光电工程, 2019, 46(3): 4–10.
Su W J, Hu Q, Zhao M, et al. Development status and prospect of optical storage technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(3): 4–10.